



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子科学与技术类专业精品教材

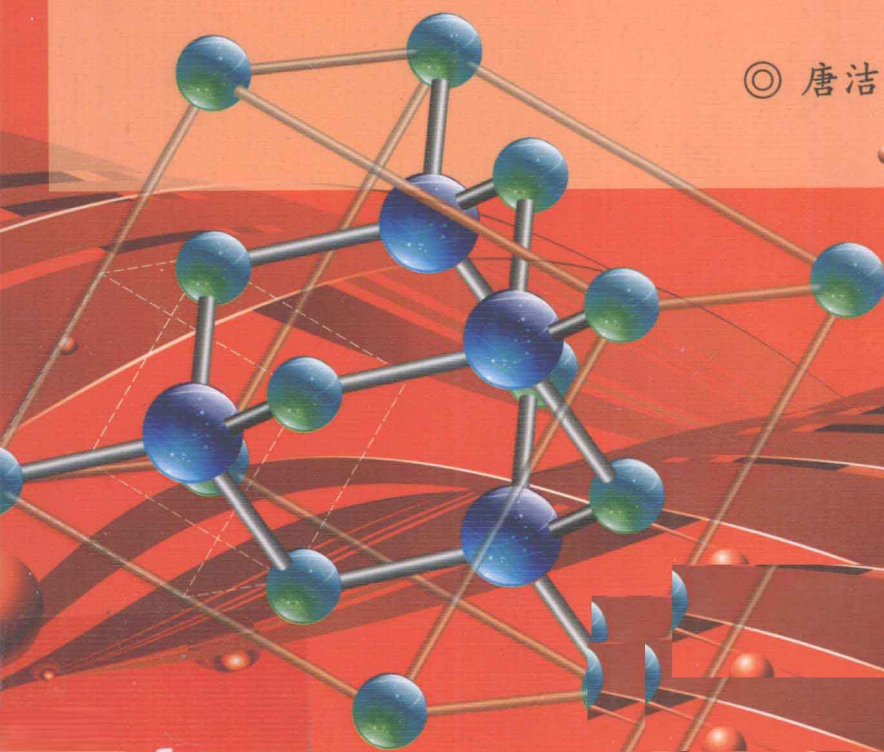
电子工程物理基础

(第2版)

Fundamentals of Electronic
Engineering Physics

Second Edition

© 唐洁影 宋竞 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子科学与技术类专业精品教材

电子工程物理基础

(第2版)

唐洁影 宋竞 编著

電 社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书涉及了量子力学、统计物理、固体物理及半导体物理方面的基本知识。内容包括:微观粒子的状态、晶体中原子状态、晶体中的电子状态和半导体中电子的状态等。主要描述了量子力学的基本原理和大量微观粒子的统计分布;晶体中电子、原子运动的普遍规律及能带的概念;半导体中载流子运动的特点及载流子的控制原理及方法。各章均附有习题。

本书将量子力学、统计物理、固体物理及半导体物理等有关内容有机地结合起来,并用生动通俗的方式叙述和讲解相关知识。在重视传统知识架构和知识点的基础上,还适当增添了少量人文色彩,参考了新兴的科普作品,加入了实用的软件介绍。本书内容简明扼要,适合于工科院校电子工程、材料科学等相关专业的学生学习,也可供有关专业的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子工程物理基础/唐洁影,宋竞编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2011.4

高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-121-13161-5

I. ①电… II. ①唐… ②宋… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 048363 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷:

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:12.5 字数:320 千字

印 次:2011 年 4 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:29.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

“电子工程物理基础”涉及了量子力学、统计物理、固体物理及半导体物理等方面的有关基本知识内容。

量子力学、统计物理、固体物理一直是综合性大学物理系的重要理论基础课。随着现代科学技术的发展需要大量的、多种多样的新材料、新器件,这些新材料和新器件利用了固体各方面的性质。这就要求工科院校相关专业的学生应具备有关理论知识。所以,多年来大多数工科院校的电子工程及有关专业类普遍开设了量子力学、统计物理、固体物理和半导体物理的课程。编者在多年的教学实践中感到,从工科院校电子工程等专业类的培养目标、课程设置以及学生对理论知识需求的深度、广度来看,都与理科院校物理系存在很大的差异。因此,沿用过去的模式,分门别类去讲授这几门课,显然难以适应工科院校的特点及专业方向的发展物理。此外,这几门课本身有着内在的联系,量子力学、量子统计是学习固体物理的基础,而半导体又是固体物理的一个重要分支。基于上述原因,我们尝试着将这几门课中有关内容有机地整合,作为一门课讲授。为此,编写了这本配套的教材“电子工程物理基础”。本教材在2002年出版后,使用多届效果不错,并于2006年被正式划入“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。

本教材以非物理专业的本科生为主要对象,重在讲解最基本的物理概念和物理思想。本次的教材修改注重避开较高深的数学知识,深入浅出,强调激发思考兴趣的培养。如在介绍第1章量子力学时,我们注重烘托与之相衬的思维革命的氛围,使同学们意识到原来一切传统都已被颠覆,然后自然提出“究竟物体中的原子和电子是什么样”的问题。第2章和第3章便分别回答这两个问题,并试图用已经讲过的量子力学原理,而不是复杂公式,去引导同学们适应这种新的思维习惯。第4、第5章讲到半导体物理和技术的时候,则突出人们渴望把知识转为实用的心情,用“如何驾驭电子和原子”这个问题贯穿始终,激发读者的学习兴趣。

在全书在结构安排上,努力尝试“两点一线”的做法。一点是历史,一点是现实,以历史和逻辑为线索,一步步织出理论轮廓,最后形成完整的知识图案。在重视传统知识架构和知识点的基础上,还适当增添了少量人文色彩,参考了新兴的科普作品,加入了实用的软件介绍。

“电子工程物理基础”教材力图将量子力学、统计物理、固体物理及半导体物理等基础知识有机地结合起来,并用生动、通俗的方式叙述和讲解相关知识。希望通过本教材的学习,读者能意识到,理论并不只是旧书架上的古董,而是技术之源,创新之本,发展之实。总的来说,使读者知道知识是谁,从何而来,向何而去,是我们的宗旨。期待能为此目标,在众位老师和同学读者的批评和指导下,于实践中反复历练,尽善尽美。

本次重编,第1章增加了在量子力学方面的最新发展及例题。第2章进行了小节内容调整,合并及充实,对晶体结构方面的内容细化讲解,增加例题,同时增加了2.5节,介绍能带结构的数值计算方法。第3~4章也进行各小节的内容细化,增加应用案例和例题。第5章增加了半导体新材料新器件及其应用。

考虑到不同学校不同专业对该课程的教学要求不尽相同,本教材使用时可分两种类型进行讲授,一种方式是主要讲前3章,为32~48学时。后两章关于半导体物理和技术方面的内容作为前3章基本知识的应用实例简单提一下,让读者根据需要自学;因为,许多学校在后续还开设“半导体物理学及相关课程”。另一种方式5章全讲,约64学时。

本教材的第一版由东南大学唐洁影、刘柯林、汪开源三位执笔。

本次由东南大学唐洁影、宋竞对原教材进行重编。

编者

2011年2月于南京

目 录

第 1 章 微观粒子的状态	1
1.1 微观粒子的力学	1
1.1.1 实与虚	1
1.1.2 经典物理	2
1.1.3 量子的发现	3
1.1.4 量子力学的诞生	4
1.1.5 正统解释	5
1.2 单个微观粒子的状态	8
1.2.1 哈密顿力学	8
1.2.2 薛定谔方程	11
1.2.3 物理量与算符	13
1.2.4 势阱模型	16
1.2.5 谐振子模型	19
1.2.6 氢原子模型	22
1.2.7 势垒模型	25
1.2.8 微扰问题	27
1.3 大量微观粒子的状态	29
1.3.1 经典统计分析原理	30
1.3.2 麦克斯韦—玻耳兹曼分布	32
1.3.3 玻色—爱因斯坦分布	33
1.3.4 费米—狄拉克分布	34
1.3.5 与其他力学的联系	36
1.4 量子场论	38
问题与习题	39
第 2 章 晶体中原子的状态	41
2.1 固体原子的结合	41
2.1.1 原子间的力	41
2.1.2 原子间的键	42
2.2 晶体原子的排列	44
2.2.1 晶体和非晶体	44
2.2.2 晶体的几何结构	44

2.2.3	晶体的物理结构	50
2.2.4	晶格的倒易结构	54
2.3	晶体原子的振动	59
2.3.1	近似与简化	60
2.3.2	经典理论	61
2.3.3	量子理论	67
2.4	晶体的热学性质	72
2.4.1	晶格振动的热容量	73
2.4.2	晶格振动的热膨胀	75
2.4.3	晶格振动的热传导	77
	问题与习题	79
第3章	晶体中的电子状态	81
3.1	金属中的电子	81
3.1.1	金属电子气	81
3.1.2	电子的统计分布	82
3.1.3	电子的热容	85
3.2	晶体中的电子—普遍解	87
3.2.1	全模型	88
3.2.2	近似和简化	88
3.2.3	布洛赫波函数	90
3.2.4	能带与能带论	92
3.3	晶体中的电子—具体解	95
3.3.1	近自由电子近似	96
3.3.2	紧束缚近似	102
3.3.3	其他近似算法	106
3.3.4	常用软件	110
3.4	外界作用下的电子	112
3.4.1	电子跃迁	112
3.4.2	电子输运	114
	问题与习题	119
第4章	半导体中电子的状态	121
4.1	电子的分布	121
4.1.1	载流子	121
4.1.2	载流子的分布	125
4.1.3	载流子的数量	129
4.2	载流子的调节	134

4.2.1	本征半导体	134
4.2.2	掺杂半导体——原理	136
4.2.3	掺杂半导体——计算	139
4.3	载流子的复合	142
4.3.1	非平衡少子的寿命	143
4.3.2	直接复合	144
4.3.3	间接复合	145
4.3.4	表面复合	147
4.4	载流子的散射	148
4.4.1	晶格振动散射	148
4.4.2	电离杂质散射	149
4.5	载流子的漂移	150
4.5.1	迁移率	150
4.5.2	电导率	153
4.5.3	强电场效应	154
4.6	载流子的扩散	156
4.6.1	净扩散	156
4.6.2	内建电场	157
4.7	载流子的完整运动	159
	问题与习题	161
第5章	半导体中电子的控制	164
5.1	半导体与外界作用	164
5.1.1	半导体与热	164
5.1.2	半导体与光	167
5.1.3	半导体与磁	169
5.1.4	半导体与力	171
5.2	半导体与金属	172
5.2.1	接触能带图	172
5.2.2	整流接触	173
5.2.3	欧姆接触	174
5.3	半导体与半导体	175
5.3.1	pn结	176
5.3.2	pn结的常规特性	177
5.3.3	pn结的异常特性	182
5.3.4	异质结	185
5.4	半导体与绝缘体	186
5.4.1	绝缘栅结构	186

5.4.2 介质电荷	187
5.4.3 表面态	188
问题与习题	190
附录 常用物理常数	191
参考文献	192

第 1 章 微观粒子的状态

1.1 微观粒子的力学

1.1.1 实与虚

辩证唯物主义指出：世界是物质的，物质是运动的，运动是有规律的。科学研究的主要目的，就是发现物质运动的普遍规律，用之于改造物质世界，提高人类的生活水平和智慧层次。

所谓物质运动的普遍规律，说到底，就是两个基本问题：什么在运动？怎么运动？放眼自然界，我们可以轻易地发现许许多多的运动现象。风在吹，云在飘，雨在下，水在流，人在走，鸟在飞，树叶沙沙，麦浪滚滚，山摇地动，星移斗转。在这些现象中，人们发现了两种最基本的运动形式，实体的运动和虚像的运动。

实体的运动，就是一个实实在在的物体的运动，客观实在性是它的根本特征。因为实在，所以具有确定的位置、质量和动量，会发生碰撞。因为实体由粒子构成，而且单个实体的运动可以简化为一个粒子来看待，所以实体运动也被称为**粒子性**的运动，如图 1-1 所示。

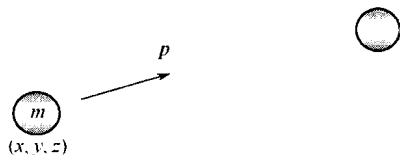


图 1-1 粒子的运动

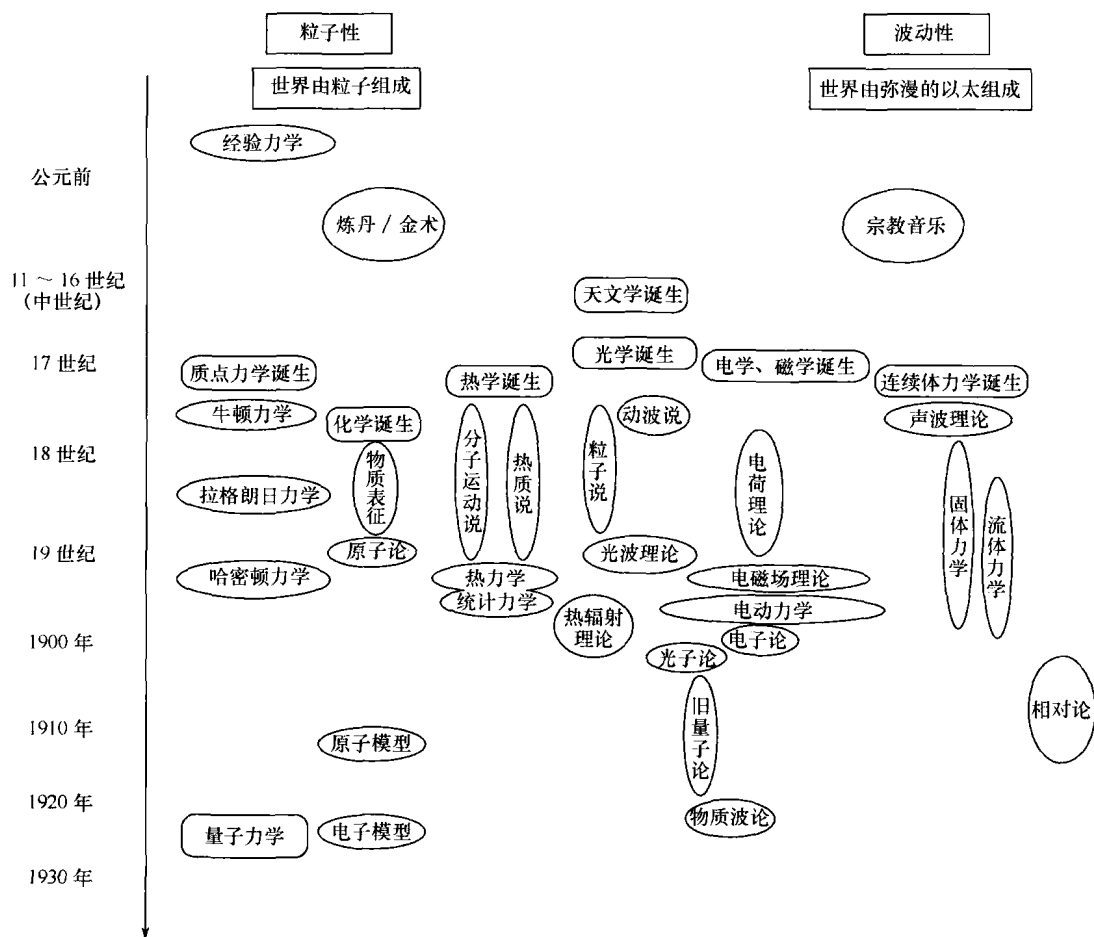
然而，当我们看到多米诺骨牌依次倒下，看到麦浪翻滚、涟漪飘逝、歌声远扬，甚至是感到欢乐洋溢、光阴流逝的时候，也会觉得有东西在传播、运动。这些运动的主体不是实在的物体，而是某种虚像。虚像弥漫在空间中，不具有确定的位置，质量和动量也无从谈起。两个虚像相遇时不会碰撞，而只是发生叠加。这类运动通常都会表现出显著的空间周期性，呈现出类似于水波一般的特征。这种特征越单一、越明显，也就越容易呈现出干涉和衍射等现象。由于这些特征出现得太频繁，和粒子运动的特征又迥然不同，因此人们自发地把它抽象出来，称为**波动性**，用另一套参数，即频率、波长等来加以描述，如图 1-2 所示。



图 1-2 波的运动

如果粒子是实，波动是虚，那么波动性是否只能算是粒子性的一种特殊表现形式？例如水

波、声波就是大量粒子原地振动的一种特殊表现形式。事实上，在量子力学诞生之前，人们几乎也都这么认为。让我们先简单回顾一下这段历史，如图 1-3 所示。



注：① 图中省略了与本书内容不相关的学科发展情况。

② 图中将化学也纳入物理发展史，读者可理解为化学是解释物质间如何相互转化的物理学。

③ 牛顿力学、拉格朗日力学、哈密顿力学合称经典力学，或理论力学。有时也将它们和固体力学、流体力学统称为经典力学。

图 1-3 经典物理发展简史

1.1.2 经典物理

中世纪结束，各门物理学科相继诞生。图 1-3 中大致按照它们粒子性特征的强弱顺序进行横向排列，越靠左粒子性越强；反之越弱。从图中看，物理学的发展历史大体可总结为 4 个阶段。17 世纪的物理研究以实验为主，注重发现现象。根据现象的不同，诞生了力、化、热、光、电磁、声 6 个基本学科。在力学和声学，因为宏观力学运动易被观测，因而很早就形成理论基础，牛顿力学和声波理论。它们后来分别发展成为质点力学和波动理论。18 世纪，人们的研究兴趣被吸引到理论领域，力学理论深化、数学化，形成了相当成熟的数学物理体系，但实验热情却有所下降。在缺乏理论指导的化学、热学、光学、电磁学学科，进展缓慢，争论频繁。19 世纪，工业技术革命的爆发提升了技术水平，再度唤起实验热情，使得非力学学科研究取得突

破。整个物理学在这一时期建立起**经典力学、热力学与统计力学、电动力学**三大体系,达到了经典的巅峰。

认识这三大力学体系对于理清我们的思路十分重要。它们虽然都冠名为力学,但研究内容各不相同。如图 1-4 所示,经典力学统一了质点力学和连续振动力学的全部内容,以最小作用量原理描述了单个对象力与运动之间的关系。热力学和统计力学则引入能量概念和统计方法,关注大量对象运动的整体效果。电动力学发明了场的概念,回答力是如何产生的问题。它们的研究领域无法相互替代,共同构成了经典物理学的基础。到 19 世纪末期,利用这三套理论,已经可以解释每个物理领域内的各种物理现象。这时唯独不太好解释的就是为什么不同物理领域的物理量可以相互转化,例如电产生力,光产生热,等等。对此,当时的主流意见是采用唯能论的思想来加以理解,认为能量是最基本的物理要素,无需再引入其他概念来解释能量本身;能量间可以相互转化是基本前提,不必用深究其内在机理,只需遵守能量守恒定律即可。在这种思想的影响下,人们一度认为,经典物理的大厦已经落成。

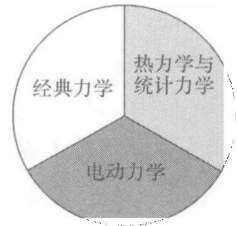


图 1-4 经典物理学的三大力学体系

1. 1. 3 量子的发现

然而,正是对各类交叉领域问题的研究导致了经典大厦的崩塌。这些问题包括:

(1) 光—物质方面,人们一直无法解释为什么原子光谱由离散的谱线组成。

(2) 光—力方面,人们仍然认为光波和声波一样是大量粒子运动的特殊表现,但一直无法实测到光波传播的粒子媒介,以太。

(3) 光—热方面,基于电动力学和热力学会推出不同的黑体辐射曲线,而且都不能与实验结果完全吻合。

(4) 光—电方面,无法解释光生电流密度与光的频率而非强度有关。

(5) 热方面,无法解释为什么不同温度下相同固体的比热会发生变化。

(6) 物理化学领域,发现了各类粒子射线的存在。

种种迹象提示人们,只有从更加底层的物质内部着眼,从三大力学体系之间的联系入手,才有望对上述难题找出合理解释。

1900 年,普朗克率先解决了黑体辐射问题。他发现,如果假设电磁场能量的传递不是连续的,而是一份一份的,就能推出完全吻合实验结果的黑体辐射公式。普朗克精确地推出了表征这种能量份额的参数,即普朗克常数 $h(6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s})$ 。他把这种一份一份的能量称为“(能)量子”。

量子这一全新概念的引入,让一些天才物理学家茅塞顿开。1905 年,爱因斯坦在量子思路指导下解决了光电效应问题。他不仅支持普朗克的能量量子化假说,认为光与电以量子形式交换能量,而且还大胆地指出这种交换媒介就是粒子形式的光,即“光(量)子”。每个光子携带的能量为

$$E=h\nu \tag{1-1}$$

其中 ν 是光的频率。按照这种说法,光就如同电流一样,是光子的流动,它和外界的能量交换通过发射和接受光子来进行。这与之前早已深入人心的“光是能量连续的电磁波”的观念截然相反。爱因斯坦还根据他创立的狭义相对论中的质能方程

$$E=mc^2$$

推出每个光子的动量应该为

$$p=mc=\frac{E}{c}=h\frac{\nu}{c}=\frac{h}{\lambda}$$

1907年,爱因斯坦将能量量子化概念引入热能域,解决了固体比热随温度跳变的难题。他敏锐地指出:固体中的大量原子的振动行为可以看作是一系列弹性波谐振子的运动,每个谐振子的能量只能取不连续值。后来人们把这种能量离散的谐振子称为“声子”。这样一来,热也具有量子特征。我们可以将热看作是一堆声子的集合,热的传递通过声子的发射和接受来进行。

1912年,爱因斯坦又把量子论应用到化学领域,提出光化学第二定律,指出初级光化学反应过程中,被活化的分子数(或原子数)等于吸收的光子数。之所以一个分子只能吸收一个光子,是因为它吸收这个光子后便进入不稳定的激发态,寿命缩短,因而很难吸收第二个光子。这一定律类似于化学领域的光电效应。

在统计力学领域,爱因斯坦也做出了划时代的贡献。在唯能论盛行的早期,爱因斯坦明确地支持分子论,指出只有把物质看作由分子构成,利用大量分子的统计力学分析,才能很好地解释液体中大块微粒的布朗运动。他第一个提出用光子出现在空间的概率来解释光波幅度的物理意义。他也是最早意识到微观领域的粒子不再符合经典统计分布的学者之一。对于这样一个在所有经典物理学领域都留下承前启后重笔的科学家,他全部的使命似乎就是为了唤醒整个世界,进入前所未有的量子时代。

在时代的召唤下,另一个同样天才的物理学家波尔也搭上了量子的早班车。1913年,波尔以电子轨道能级只能取特定不连续值等一系列假设,改进了原有的原子模型,解决了氢原子谱线不连续的难题。他还提出量子跃迁的概念,指出物质以电子在不连续能级间的跃迁的形式,发射或吸收外界光子的能量,从而解释了光、电、磁三者之间的能量转化机理。这就为宏观的能量守恒定律找到了合理的微观解释,大大提高了量子学说的生命力。历史上把这段时期称为旧量子论时期,它为量子力学的诞生打下了无法撼动的基础。

1.1.4 量子力学的诞生

量子力学的诞生是物理学有史以来最大的一次革命。在下面的介绍中,我们将看到,它几乎颠覆了经典物理所有的常识。这种思想的革命是如此的彻底,以至于波尔曾经矛盾地说过,谁要是说他懂得量子力学,那么他实际上还没有弄懂。因此,在尝试阐明量子力学的基本思想之前,有必要整理一下到目前为止的思路。

首先,实验现象告诉我们,电磁能是不连续的,只能以量子形式一份份传递。电磁能由谁来传递?光子。光子是怎么产生的?电子在不连续能级间的跃迁,产生和吸收光子。那么下一个问题就是,为什么电子能级是不连续的,离散的,量化的?

对于这个问题,波尔只是人为假设如此,并猜出了能级的量子化表达式。虽然大家能够接受他的结论,但并不喜欢这种主观色彩严重的假设。有没有什么可以自然推出量子能级的方法呢?人们开始从记忆里搜索所有与离散有关的知识,希望从中找到灵感。

第一个想到量子能级的人是德布罗意。德布罗意在物理感兴趣之前,曾经学过历史。这种特别的史学素养使得他从物理学史中找到线索。他研究了光从粒子论发展为波动论,波动理论和质点力学统一为哈密顿力学,以及同时代量子论发展的各种成果,尤其是爱因斯坦的

光子说,发现了波和粒子的运动方程在形式上的相似性和互补性。既然对光的描述与粒子相近,为什么对粒子的描述不可以引入波呢?特别是波动理论中的驻波行为(德拜首先提出了驻波说,但他没有上升到物质波的高度),具有强烈的量子化色彩。如果电子具有波的特性,那么它的能级量子化不就顺理成章了吗?1923年,德布罗意大胆地提出物质波假设,指出所有运动的物质粒子都具有波的特性,如果粒子的动量矢量为 \mathbf{p} ,则对应物质波的波长 λ 满足德布罗意公式

$$\mathbf{p} = \frac{h}{\lambda} \mathbf{n} = \hbar \mathbf{k} \quad (1-2)$$

其中, \mathbf{n} 是方向矢量, \mathbf{k} 是波矢,其数值 $2\pi/\lambda$ 是波数, $\hbar = h/(2\pi)$ 。波矢的矢量特征使它比波长 λ 更频繁地用来描述问题。物质波假设在1927年由电子晶格衍射实验得到证实。电子的衍射图案和预测的一模一样。而在此之前,无论是阴极射线的发现,还是云室中的电子轨迹实验,都指向电子是粒子的结论。

物质波假设诞生之后,立刻受到爱因斯坦的关注,他推荐正在研究气体统计力学问题的薛定谔认真考虑该假说的价值。1926年,波粒在理论上的统一体——薛定谔方程横空出世,以其无与伦比简洁的形式、深奥的内涵和准确的描述,将经典力学升级到波动力学版本,赢得了整个物理界的赞美。有趣的是,薛定谔并不是基于严格的方法推导出这个方程,而是用物理直觉有意把质点力学和波动理论关联起来后得到了结果。但推出的方程,却极其成功地解释了各种实验结果,从而为大家所接受。将在1.1.5节中详细了解这个方程。

第二个想到量子能级的人是海森堡。1925年,年轻的海森堡以一种近乎哲学的视角提出了风格迥异的解决办法。他觉得,与其建立一个想象中的模型来解释观测到的量子化结果,不如基于测得的结果来建立这个模型。在能级量子化问题中,只有能级差是能被观测到的,能级本身的价值无法观测,因此它没有物理意义。基于这种思路,海森堡和约尔当合作,建立了一套形式统一的方程组,每个方程分别对应一个被观测到的能级差。通过图中方法可以自然地在数字上得出能级量子化的结论,当海森堡把这个方法汇报给他的老师波尔时,波尔指出,这就是数学中的矩阵。现在我们都知道,矩阵问题和波动方程一样,都具有离散的本征值。这种用矩阵方法表示的力学理论,就是经典力学的另一个升级版,矩阵力学。同年,狄拉克用更简单的泊松括号方法,简化了矩阵力学的表达形式。

值得说明的是,矩阵力学的思路,不用假设粒子具有波动性,但需要以牺牲物理量的连续性为代价。换句话说,海森堡认为,物理量的连续性是假象,我们实际上能观测到的,只是两次观测之间物理量的差,无论位移、动量、能量,还是时间都是如此。我们会以为物理量是连续的,是因为差值太小,就像动画片相邻图片间隔太短就会造成连续的错觉一样。

1926年,薛定谔、泡利和约尔当各自证明,波动力学和矩阵力学这两个升级版完全等价。它们基本上就构成了我们现在所说的量子力学。它沿着牛顿力学、拉格朗日力学和哈密顿力学一路发展而来。牛顿力学描述了单个宏观粒子的力与运动的关系,而量子力学则揭示了单个微观粒子的力与运动规律。随着研究对象的尺寸从微观向宏观增加,量子力学的结果将逐渐逼近、直至吻合牛顿力学结果。所以说,量子力学兼容了经典力学,是目前的最高形式。有关微观和宏观问题的判别界限将在1.1.5节的测不准原理中介绍。

1.1.5 正统解释

1. 概率波原理

方程形式虽然尘埃落定,但真正的硝烟才刚刚燃起。尽管两种力学方程被证明等价,但我

们看到,它们的前提思路截然不同。波动方程是以连续的波动性为前提,而矩阵力学是以不连续性的粒子性为前提。在物质到底是波还是粒子的问题上,它们显然持相反的观点。尽管波动方程在形式上更加优美、简洁,但方程的主角,波函数的意义迟迟没有确定。从德布罗意开始,它就只是假设出来的波函数,没有人给出它合理的物理解释,包括薛定谔自己。薛定谔曾经假设电子波函数是电荷密度分布函数。但如果按照这种解释,电子的质量和电荷都将会不再集中在一个点上,那么它在很多问题中都将无法表现出显著的粒子特性,这与实验结果不符。

在此之前,爱因斯坦曾经对光波函数的物理意义做出过合理的解释,认为光波幅度与大量光子分布在空间的概率有关。受此启发,1926年,海森堡的另一位老师,波恩站了出来,做出了一个比爱因斯坦更加大胆的论断:微观粒子的波函数不仅反映了大量粒子分布的概率,而且反映了单个粒子出现的概率,它就是单个粒子的**概率波**。这其中最关键的区别在于,概率分布的大量粒子中,每个粒子仍然遵守因果规律。理论上说,我们可以不用统计方法,而用经典力学方法对每个粒子建立方程,预测每个粒子的运动轨迹,应该和统计方法计算出来相同的结果。这个概率性是建立在大量粒子的统计性基础之上的。然而,如果单个粒子也是以概率形式出现,那么物理事件的发生将不再遵循因果律。电子的轨迹将变得神出鬼没,你只能知道它出现在某个位置的**概率**,而不知道它什么时候会出现在这里。最有力的证据就是电子衍射实验。电子的光斑一个一个随机出现在荧光屏上的,无法预测下一个电子将出现在什么位置,只能预测统计的衍射图案。后人把概率波的观点比喻为“上帝掷的骰子”。

2. 测不准原理

更离奇的还不止于此。1926年,创立了矩阵力学的海森堡继续发现,如果承认矩阵力学方程是正确的,那么根据矩阵乘法的不可交换性,会导出一个奇怪的结论,那就是 $p \cdot q \neq q \cdot p$,其中 p 为动量,而 q 为位移(位置)。海森堡一贯坚持只有可测的物理量才有意义,因此他特别关注这种不可交换性与测量之间的关系。海森堡从 p 和 q 的测量误差 Δp 和 Δq 的角度,对这个不等式进行了推演,结果发现了下面的两个推论,即

$$\Delta p \cdot \Delta q > h \quad (1-3)$$

这个推论的另一个等价形式为

$$\Delta E \cdot \Delta t > h \quad (1-4)$$

这就是**测不准原理**,又称**不确定性原理**。它说明,既无法同时准确测得动量和位置,也无法同步准确测得能量和时间。推论是,经典力学量是不可能被同时准确测得的。海森堡对其物理原因做出了简单的解释:任何一种测量手段,在测量某物理量的同时,必定带来对其对应物理量的干扰,使得这一对物理量无法同时被准确测得。例如,测量某粒子的位置,需要接受它发出的光子,而发出光子必然影响其原有动量。

测不准原理极大地提高了**测量**在物理诠释中的地位,解释了波动性和粒子性实验现象的矛盾起源,并且为概率波原理提供了理论依据。当我们去做粒子类实验,例如电子云室轨迹实验时,一旦我们测定其位置,就完全无法测准其动量。动量测不准,物质波的波长就不能确定,因而无法在粒子类实验中观测到对象的波动性。而在波动类实验,例如电子衍射实验中,一旦我们测到电子是物质波,会衍射,就无法像阴极射线那样确定其位置,只能看到随机出现的电子光斑。总之,能测准粒子就测不准波,能测准波就测不准粒子。薛定谔方程中的波函数就是站在波的一面描述对象,因此对象的粒子性无法确定,粒子位置只能听从概率分布。

测不准原理中的最小误差乘积,即普朗克常数 h ,还为衡量微观和宏观问题的界限提供了理论依据。普朗克常数决定了物理上所能测量到的位置和动量的误差乘积的极限。即使采用最精良的设备,也不可能突破这个误差。在宏观领域中普朗克常数 h 的作用可略去,但在微观领域它起着重要的作用。例如,将动量的不确定性改写成速度的形式,这样 $\Delta p_x \Delta x = h$ 变为 $\Delta v_x \Delta x = \frac{h}{m}$,当质量 m 很大时,等式的右端趋于零可以忽略速度和位置的测量误差,但这只有在宏观物体上才会出现,也就是说宏观时“测得准”。当 m 很小时, $\Delta v_x \Delta x \neq 0$,此时用多好的测试方法也无法将速度与位置的测量误差的乘积降为零,也就是说微观时“测不准”。例如,一粒微尘, $m \approx 10^{-12}$ g,若其位置不准确度 $\Delta x \approx 10^{-8}$ cm,这对宏观测量来说已是相当精确了。由不确定性原理可得 $\Delta v \approx 6.6 \times 10^{-7}$ cm/s,而实际宏观测量的误差远没有这么小,微尘将表现出“明确”的轨道和速度。但如果是氢原子中的电子,按波尔理论估计出其速度量级为 10^6 m/s,即使假定电子速度的不确定度与速度值的量级相仿,那么由不确定性原理可知,电子位置的不确定度为 10^{-10} m,这与氢原子的线度已经同数量级,因此电子运动轨迹的概念完全失去意义,电子以概率形式在空间出现。

3. 互补原理

测不准原理仅仅告诉我们,波和粒子特性无法同时测得。然而一个物质到底是粒子还是波?当海森堡将不确定性原理汇报给老师波尔后,波尔对这一段时期以来量子力学的研究成果进行了深刻的思考,于1927年提出**互补原理**,把**波粒二象性**上升到了量子力学的最高原理的高度。他的原话是:“一些经典概念的应用不可避免的排除另一些经典概念的应用,而这‘另一些经典概念’在另一条件下又是描述现象不可或缺的;必须而且只需将所有这些既互斥又互补的概念汇集在一起,才能而且定能形成对现象的详尽无遗的描述。”

表面上看,互补原理似乎只是把不可调和的波动性和粒子性敷衍地拼凑在一起。但事实上,波尔想强调的是一种测量现象意义上的互补性。他既不认为物质同时具有波和粒子特性,即波粒的叠加性,也不认为必须从波动性和粒子性中选择其一,即波粒的矛盾性。真正的物质特性只有一个,即波粒二象性,而不是两个。但这个二象性在每次测量中只可能表现出一面,要么是波动性的那一面,要么是粒子性的那一面。

这个原理最让人费解的推论是,想要测量哪一面,另一面就不会表现出来。但事实却恰恰证明了这一点,典型的例子是电子双缝干涉实验,如图 1-5 所示。实验本来的设置是“想测波动性”,控制缝隙线度使波动干涉现象展现。正常做法下足够长时间后就会看到荧屏 A 上出现预期的干涉条纹。但如果人们想测得电子究竟经过了哪个缝,而在缝的后设置荧屏 B 时(或是其他检测手段),那么问题就变成了“想测粒子性”。这时荧屏 B 上可以测到亮点,但在荧屏 A 上就没有干涉

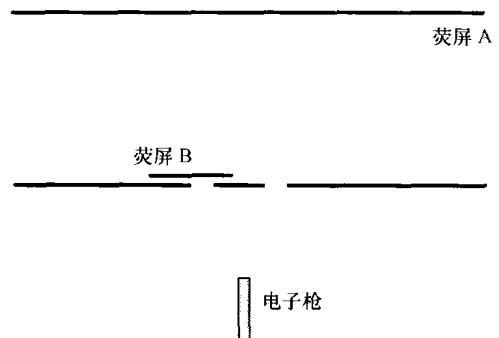


图 1-5 电子双缝干涉实验

条纹,甚至连衍射条纹都没有——电子已经在测量中展现了粒子性,因此无法展现波动性。这实际上暗示着,想测到什么可以影响发生了什么,结果可以影响原因,又一次违背了因果律。但即使如此,波尔的这种实证主义做法,就像一件合体的紧身衣,以最简单紧凑的方式概括了

量子力学的理论基础。它不引入任何多余的假设或理论,又符合实验的观测结果避免陷入无休止的循环论证。

4. 坍缩

最后还剩下一个关键问题。既然每次观测只能看到对象的一面,那么这种由本质上的波粒二象性,转化为观测时刻的粒子性/波动性的过程,究竟是怎样发生的?以电子衍射实验为例,如果我们想测到电子的波动性,可一旦用荧光屏观测单个电子位置时,电子并不是散布在屏幕上各个位置,而是在瞬间随机选择一个位置,以100%概率出现于此。人们把这种概率函数瞬间集中于一点的行为称为“坍缩”。哪怕原本概率波分布的空间再大(如整个宇宙),那么观测的一刹那,其他地方的概率就像约好了一样,一起瞬间消失。按爱因斯坦的说法,这实际上暗示了一种超距作用。它们怎么能够在这么短的时间里和这么大分布空间中保持同步行动呢?

对于这一质疑,波尔等人依旧避繁就简,从哲学而不是物理上予以回答。波尔指出:只有被观测时物理状态才有意义,不去观测时物理状态没有意义,不存在,也不必去讨论。既然不存在,那么不符合物理常识就不足为奇。我们看到,这种论断赋予了“测量”极高的物理地位,符合波尔等人的一贯做法。但它实在有些主观,遭到了很多学者的怀疑。爱因斯坦说,很难想象你不去看月亮的时候它是不存在的,并提出EPR佯谬予以反驳。薛定谔也提出了十分有趣的薛定谔猫佯谬。此后的研究者相继提出意识作用、平行宇宙、退相干等各种原理,试图回答这一难题。有兴趣的读者可以参阅曹天元先生编写的《量子力学史话——上帝掷骰子吗》,了解这些有趣的思想。我们也将后文中结合实例继续解释上述概念。

5. 小结

尽管概率波原理、测不准原理、互补原理、坍缩这一系列概念与经典的因果性、精确性和物质决定论理念是如此的格格不入,但它们合在一起,确实构成了逻辑上相对圆满的解释体系。提出这些解释的物理学家,波尔、海森堡和玻恩当时都在丹麦的哥本哈根大学理论物理学研究所工作。他们相互启发,互为师友,形成了著名的哥本哈根学派。

令人感慨的是,这一套解释遭到了另外三位量子力学的奠基者,爱因斯坦、薛定谔和德布罗意的坚决反对。他们都是坚定的因果律者,不相信物理事件会以概率形式不够精确地发生。用爱因斯坦的话说,上帝不掷骰子。这两派之前为了哥本哈根解释的完备性问题进行了多次论战,但基本都以哥本哈根学派的不败而告终。无论如何,哥本哈根学派的解释至少稳住了量子力学的根基,使人们得以把更多精力投入量子力学的应用中。后来的发展也逐渐证明了其中很多观点的正确性。为此,人们把它称为**正统解释**,以此认可哥本哈根学派在开创和普及量子力学过程中所做出的巨大贡献。

回顾量子力学的发展历程,我们注意到,经典物理的实与虚的概念逐渐模糊。实的粒子性和虚的波动性互补构成了完整的物质属性。没有谁比谁更加基本,有的是谁在观测中能得以显现,谁在问题中更适合用来正确描述物质行为。物理就是这样不可思议。而爱因斯坦说,世界上难以理解的,就是事情是可以理解的。难道不是如此吗?

1.2 单个微观粒子的状态

1.2.1 哈密顿力学

科学的发展是一个循序渐进的过程。其实早在量子力学发展之前,力学理论领域就已经